

基于离散元的岩石冻融损伤劣化机制研究

贾朝军¹, 庞锐锋¹, 俞 隽², 雷明锋¹, 李 忠³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 南通大学 交通与土木工程学院, 江苏 南通 226019;
3. 湖南铁院土木工程检测有限公司, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 冻融损伤岩石的劣化机制研究对于认识冻融灾害机制、灾变预测与寒区隧道防护体系设计具有重要理论意义。基于体积膨胀理论, 建立了冻融过程中不可逆体积增加与冻融次数的关系方程, 推导了冻融循环过程中圆柱形试样热量径向传递规律。考虑饱和试样冻融损伤过程, 建立了基于离散元的岩石冻融损伤模型。开展了不同冻融循环次数的砂岩物理力学性质测试, 通过应力-应变曲线及单轴抗压强度验证了该模型的有效性。在此基础上, 分析了冻融循环过程中岩石试样中裂纹生长规律及层进式分布特征, 研究了冻融-应力耦合条件下岩石试样裂纹扩展过程。研究结果表明: 随着冻融循环次数的增加, 裂纹的发育经历了缓慢增长、快速增长及趋于稳定 3 个发展阶段。裂纹数沿径向方向由内而外层进式增加, 80% 左右的冻胀裂纹分布在距离试样轴心 10~25 mm 的圆环柱区域内。当冻融次数小于 80 次时, 裂纹数随距圆心距离的增加呈指数函数关系; 当冻融次数大于 80 次时, 裂纹数与距圆心距离呈对数函数关系。冻融循环过程中, 试样内的破坏以拉伸破坏为主, 岩石的冻融损伤过程受初始孔隙结构控制。

关 键 词: 冻融损伤; 离散元方法; 体积膨胀; 热传导; 裂纹

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 02-588-13

Investigation on freeze-thaw damage mechanism of porous rock with discrete element method

JIA Chao-jun¹, PANG Rui-feng¹, YU Jun², LEI Ming-feng¹, LI Zhong³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China;

3. Hunan Tiesuan Civil Engineering Testing Co., Ltd., Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: The study of the degradation mechanism of freeze-thaw damaged rock holds significant theoretical importance in understanding freeze-thaw disasters, predicting disasters, and designing tunnel protection systems in cold regions. Based on the volume expansion theory, this research establishes a correlation between irreversible volume increase and the number of freeze-thaw cycles, and also deduces the law of radial heat transfer for cylindrical samples during freeze-thaw cycles. Considering the freeze-thaw damage process of saturated samples, a model of rock freeze-thaw damage based on discrete elements is developed. The physical and mechanical properties of sandstone with different freeze-thaw cycles are tested to validate the model, using stress-strain curves and uniaxial compressive strength. Building upon this, the growth and distribution of cracks in rock samples during freeze-thaw cycles are analyzed, and the crack growth process under coupled freeze-thaw-stress conditions is studied. The research findings indicate that as the number of freeze-thaw cycles increases, the development of cracks undergoes three stages: slow, fast, and then steady. The number of cracks increases radially from the inside to the outside of the sample. Approximately 80% of the frost heave cracks are distributed in the circular column area 10-25 mm away from the sample's axis. When the number of freeze-thaw cycles is less than 80, the increase in the number of cracks follows an exponential function relationship. However, when the number of freeze-thaw cycles exceeds 80, the number of cracks increase logarithmically with their distance from the center of the circle. During the freeze-thaw cycle, the damage in the sample primarily occurs through tensile failure, and the freeze-thaw damage process of the rock is influenced by the initial pore structure.

Keywords: freeze-thaw damage; discrete element method; volume expansion; heat conduction; cracks

收稿日期: 2023-02-24

录用日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52008403)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52008403).

第一作者简介: 贾朝军, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道工程方面的研究。E-mail: jiachaojun@csu.edu.cn

通讯作者: 俞隽, 男, 1988 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石多场多尺度本构关系及岩体工程应用等方面的研究工作。E-mail: yujunhisl@foxmail.com

1 引言

随着“一带一路”倡议的深入实施，我国西部及东北地区等寒区的铁路隧道、公路隧道及引水排水隧洞等重大工程建设日益增多。寒区昼夜温差大、冻融剧烈，天然岩体中赋存的孔隙水和裂隙水在气温交替变化下冻结、融化、再冻结，往复循环。必将引起岩体的微观损伤、冻胀碎裂以及破坏失稳等一系列物理力学性能的劣化。因此，开展冻融循环条件下岩体的力学性能劣化机制研究对于认识冻融灾害机制、灾变预测与寒区隧道防护体系设计具有重要理论意义^[1]。

早在20世纪60年代，Winkler^[2]通过试验发现岩石中的孔隙水在0℃下发生相变，形成孔隙冰，其产生膨胀力导致岩体体积膨胀，并且膨胀力会随着温度的降低而不断增加且远远超过岩石的强度，进而引起岩石的冻胀破坏。此后，许多学者研究了不同试验条件下冻融循环对岩石物理力学性质的影响。徐光苗等^[3]开展了红砂岩及页岩的冻融循环试验，分析了冻融系数与循环次数的关系。周科平等^[4]对不同冻融循环次数的花岗岩进行了核磁共振测量，基于核磁共振图像分析了岩石的孔隙分布特征。张继周等^[5]基于粉砂质泥岩、辉绿岩和白云质灰岩的试验结果，探讨了岩石冻融损伤劣化模式及其影响因素。刘泉声等^[6]对裂隙岩体中的冻融水分迁移机制、裂隙冻胀力大小及其影响因素进行了系统地归纳分析，并探讨了裂隙岩体冻融损伤产生机制。声发射、计算机断层扫描（computed tomography，简称CT）等一些新的测试技术也被用于分析岩石的冻融损伤裂纹扩展机制^[7-8]。宋勇军等^[9]开展了冻融循环条件下红砂岩三轴蠕变试验，研究了冻融循环与长期荷载耦合作用下岩石的时效力学特性。

除试验方法外，一些学者还采用数值方法对冻融损伤进行分析。汪鑫等^[10]采用数值仿真模拟重现了英安岩冻融循环过程中试样内部温度及应力-应变的演化特征，揭示了冻融损伤劣化的力学机制。Huang等^[11]开发了一个基于COMSOL软件的热水力（thermo-hydro-mechanical，简称THM）全耦合模型，用于模拟冻结条件下的传热和岩石变形。Fogue-Djombou等^[12]使用有限元模型通过监测脉冲振动响应的结果来评估石灰岩的抗冻融性。此外，Yahaghi等^[13]在单轴抗压强度测试（uniaxial compression strength，简称UCS）和巴西劈裂测试（Brazilian tensile strength，简称BTS）中使用自主开发的基于广义图形处理单元（general-purpose

graphic processing units，简称GPGPU）的三维混合有限离散元方法（hybrid finite-discrete element method，简称HFDEM）进行了三维数值模拟，研究了Tasmanian砂岩在冻融循环中的损伤机制。尽管有限元方法（finite element method，简称FEM）可进行复杂的热-力耦合建模以分析冻融损伤机制，但由于连续介质力学的限制，尚不能对岩石的断裂行为和裂纹演化进行模拟。而离散元方法（discrete element method，简称DEM）在模拟冰体积膨胀引起的岩石损伤和断裂机制方面具有先天优势，近些年来得到了学者们的重视。比如王瑾^[14]采用PFC^{2D}对裂隙岩体冻融断裂特征进行了分析。朱谭谭等^[15]提出了一种基于颗粒流和颗粒膨胀的岩石冻融循环数值模拟方法，研究了岩石冻融过程中的变形和破裂演化规律。

综上所述，考虑颗粒膨胀的离散元分析方法为研究冻融循环岩石损伤机制提供了一个新的思路，然而现有颗粒膨胀模型虽然能够在一定程度上反映冻胀破坏的物理机制，但是却忽略了冻融过程中极其重要的热传导过程。冻融循环中岩石内部温度与表面温度之间存在一定差异，相应的离散元模型中也要能够反映这种内外温差的变化。此外，传统模型中，颗粒膨胀后产生的不可逆变形与冻融循环次数之间的演化规律并不明确，造成传统模型中颗粒体积会随着冻融循环次数的增加无限膨胀下去。因此，本文基于体积膨胀理论构建一种新的颗粒膨胀模型，通过引入热传导方程及不可逆孔隙体积增加率演化方程，建立能够真实反映岩石冻融循环物理机制和物理过程的离散元模型。

2 岩石冻融损伤机制

2.1 冻融损伤对岩石物理力学性质的影响

尽管国内外学者对冻融循环条件下不同岩石试样的物理力学性质开展了广泛的研究，但是由于岩石的多样性及环境的多变性，至今尚无统一的冻融损伤模型以描述自然环境中岩石的冻融劣化过程。

总结现有研究成果，冻融损伤对岩石物理力学性质的影响因素主要包括岩石自身性质、环境特征以及应力状态等。

岩石自身性质对冻融损伤的影响体现在对冻融作用强度的影响及在冻融作用下其自身抵抗冻融损伤的能力两方面。岩石的导热系数、比热容等性质控制着冻融过程中的热传导过程，进而影响结冰的速率及范围。岩石的孔隙率及孔隙结构特征决定

着冻融过程中水分迁移及体积膨胀的发展。岩石孔隙中水冻结成冰产生的冻胀力微观上表现为作用在裂纹尖端的集中拉应力，当拉应力超过岩石的断裂强度时，宏观上即表现为冻融损伤。

外界环境条件主要包括温度条件及湿度条件。温度对冻融劣化的影响体现在其决定了岩石内部水冻结成冰的比例、冻结的速率及冻结的持续时间^[16]。液态水的存在，使得岩石孔隙中的水冻结成冰产生冻胀力，因此湿度条件是冻胀损伤能否发生的决定因素。此外，岩石冻融损伤过程是一个典型的 THM 多场耦合过程。应力状态与温度、渗流条件共同作用造成岩石内部微缺陷的发展，进而引起宏观性质的损伤劣化。

大量的试验表明，冻融损伤会造成岩石质量损失、孔隙率增加、强度和变形参数降低等^[17]。学者们采用不同的经验公式描述这种物理力学参数的劣化现象。总结文献[18-21]的试验结果（见图 1），冻融损伤对岩石孔隙率的影响可表示为

$$\varphi = \varphi_k - \varphi_1 e^{-\lambda N} \quad (1)$$

式中： N 为冻融循环次数； φ 为岩石的孔隙率； φ_k 为无限次冻融后岩石的最终孔隙率； φ_1 为冻融损伤引起的孔隙率增量； λ 为孔隙率衰减常数，是控制孔隙率演化速率的参数， λ 越大，表明孔隙率在较短的冻融次数内趋近于极限值。图 1 中 φ_0 为岩石的初始孔隙率， $\varphi_0 = \varphi_k - \varphi_1$ 。

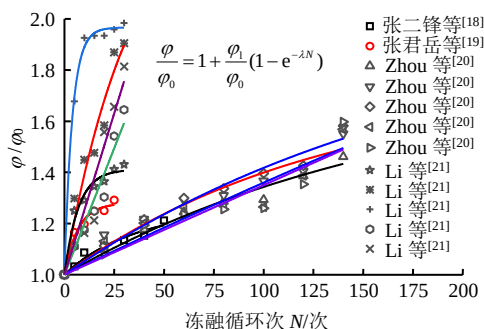


图 1 岩石孔隙率随冻融循环次数演化关系

Fig.1 Evolution of porosity of rock with the number of freeze-thaw cycles

分析文献[22-27]的试验结果（见图 2），冻融损伤对岩石强度的影响可采用下式描述：

$$\sigma_{\text{UCS}} = \sigma_f + \sigma_{\xi} e^{-\eta N} \quad (2)$$

式中： σ_{UCS} 为单轴抗压强度； σ_f 为极限冻融循环次数下的单轴抗压强度； σ_{ξ} 为由于冻融损伤造成的单轴抗压强度的降低量； η 为控制单轴抗压强度随冻融次数演化速率的参数。图 2 中， σ_0 为未发生冻融损伤

的岩石试样的单轴抗压强度， $\sigma_0 = \sigma_f + \sigma_{\xi}$ 。

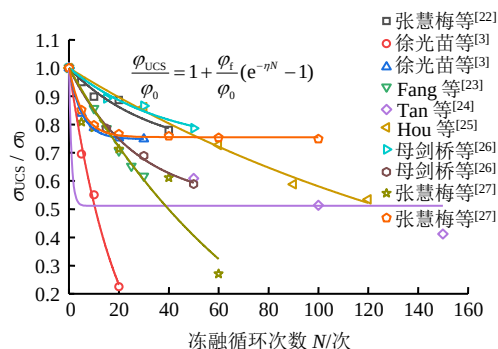


图 2 岩石单轴抗压强度随冻融循环次数演化关系

Fig.2 Evolution of UCS of rock with the number of freeze-thaw cycles

2.2 多孔介质冻融体积膨胀理论

根据孔隙结构类型及其连通性，岩石可分为多孔介质及裂隙介质。其中对于孔隙率较高、连通性较好的一类岩石如砂岩、泥岩等，描述其冻融损伤机制的理论有体积膨胀理论^[28]、静水压力理论^[29]、分凝冰理论^[30]、毛细管理论^[31]和结晶压理论^[32]等。

目前仍没有一种理论可完全揭示观察到的冻融劣化现象。但体积膨胀理论对于含有封闭孔隙空间（或冰体积膨胀造成的封闭空间）的岩石是被广泛接受的，因此本文试图在该理论框架下建立适用的岩石冻融损伤离散元分析方法。

根据描述多孔岩石冻融损伤的体积膨胀理论^[18]，岩石在冻融作用下的损伤与水在相变前后体积增加这一特性相关。如图 3 所示，水在结冰过程中发生约 9% 的体积膨胀^[33]，体积增加导致孔隙壁受到冰压力的上升。依照上述理论，冻融循环过程中多孔介质孔隙中水冻结体积膨胀是导致材料损伤的主要原因。冰融化后体积收缩，原受压孔隙中的压力减小，孔隙的部分变形得以恢复，但冻胀引起的损伤仍然造成试样内产生不可恢复的变形。

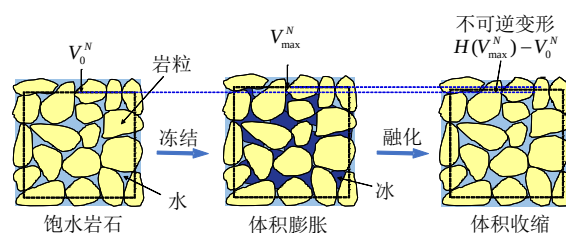


图 3 基于体积膨胀理论的岩石冻融损伤示意图

Fig.3 Schematic diagram of volume expansion theory under freeze-thaw cycles

当温度低于 0 °C 时，岩石当中未冻结含水率 w_u 与温度 T 之间存在如下关系^[34]：

$$w_u = 1 - \left[1 + 0.139 \left(\frac{1}{T} \right)^{1/3} \ln \left(\frac{1 + e^{0.268T}}{2} \right) \right] (1 - e^{0.268T}) \quad (3)$$

由此可知，每次冻融循环过程中冰颗粒的最大体积 $V_{\max}^N$ 为

$$V_{\max}^N = V_0^N + V_0^N (1 - w_u) \left(\frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{ice}}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中： V_0^N 为第 N 次冻融循环中冰颗粒的初始体积；未冻结合水率 w_u 由式 (3) 计算得出； ρ_{water} 和 ρ_{ice} 分别为水和冰的密度。由于冰颗粒体积的增加会引起岩石孔隙体积的增加，并且增加的这部分岩石孔隙体积中，有部分是无法恢复的。当岩石处于富水环境中，这部分无法恢复的孔隙会被水填充，造成每次冻融循环中冰颗粒初始体积 V_0^N 的增加。

假定每次冻融循环中，冰颗粒体积变化引起的不可逆孔隙体积增加率 H 为定值，则每次冻融循环中冰颗粒的初始体积为^[35]

$$V_0^N = V_0^{(N-1)} + H(V_{\max}^{N-1} - V_0^{N-1}) \quad (5)$$

式中： V_0^{N-1} 为第 $N-1$ 次冻融循环中冰颗粒的初始体积； $V_{\max}^{N-1}$ 为第 $N-1$ 次冻融循环中冰颗粒的最大体积。尽管式 (5) 可以很好地解释冻融的物理过程，但是每一次冻融循环中冰颗粒初始体积 V_0^i 会随着循环次数的增加无限膨胀下去。大量的试验结果表明，随着冻融次数的增加，由冻融导致的体积膨胀不会再继续变化^[36]。式 (5) 这种理想状态下的冰颗粒的体积膨胀与真实的冻融循环过程相悖。此外已有的试验结果^[37-38]表明，水冻结体积膨胀导致岩石物理力学参数的衰减会趋于一个稳定值。这意味着冻融过程中，冰颗粒的体积并不会无限膨胀下去，也会趋于一个稳定的数值。因此，需要对式 (5) 中每次冻融循环引起的不可逆孔隙体积增加率 H 进行修正。借鉴 Mutlutürk 等^[38]建立冻融循环过程中岩石完整性损伤衰减函数模型思路，本文假定不可逆孔隙体积的增加率与每次循环开始时的不可逆孔隙体积成正比，该假定可以表示为 $-\{dH/dN\} = \lambda H$ 。其中 $\{dH/dN\}$ 为不可逆孔隙体积的增加率，负号表示不可逆孔隙体积增加量正在下降。

在循环次数上对上述方程进行积分，可得第 N 次冻融循环中不可逆孔隙体积的增加率 H_N 与初始冻融循环不可逆孔隙体积的增加率 H_0 之间的关系为

$$H_N = H_0 e^{-\lambda(N-1)} \quad (6)$$

该方程是一个描述性模型。换句话说，它解释了岩石中不可逆孔隙体积的增长在这种循环作用下是如何表现的。 $e^{-\lambda(N-1)}$ 是衰减因子，表示经过 N 次

冻融循环后，不可逆孔隙体积增加率的减小比例。将式 (6) 代入式 (5) 即可获得每次冻融循环中冰颗粒的初始体积：

$$V_0^N = V_0^{N-1} + H_0 e^{-\lambda(N-1)} (V_{\max}^{N-1} - V_0^{N-1}) \quad (7)$$

2.3 冻融循环热传导理论

通过以上分析，获得了冰颗粒的体积随温度膨胀的关系。然而如前所述，冻融循环是一个热传导的过程，热量是由试样表面逐渐向试样内部扩散的，冰颗粒的冻胀也应由试样表面逐渐向试样内部扩散。

因此，数值模型中必须考虑热传导过程。考虑热量在标准圆柱形试样中传播，本文对冻融过程进行了一些理想化的假定，认为热量仅沿试样径向传播，将三维圆柱体中热传导问题简化为二维圆盘中的热传导问题，如图 4 所示。由于圆盘具有对称性，可以进一步将其简化为径向上一维热传导问题，即将圆盘看成由无数根经过轴心的一维线段组成，每根线段的宽度为 0，长度为 $2R$ 。线上的初始温度均为 0，在 $x=0$ 与 $x=2R$ 处的边界温度始终维持常数 T ，热量由线的两端向线的中心传递。随着时间 t 的增加，线上的温度分布趋于一致，整个线上的温度最终都为 T 。对于该一维问题的通解为

$$T(x, t) = T + \frac{1}{R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \sin(\beta_m x) \frac{2R}{\beta_m} + \frac{1}{R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \frac{1}{\beta_m} [T(\cos m\pi - 1)] \sin(\beta_m x) \quad (8)$$

上述通解关于 $x=R$ 对称，对于圆柱试样，上述方程可改写为

$$T(r, t) = T + \frac{1}{R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \sin(\beta_m r) \frac{2R}{\beta_m} + \frac{1}{R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \frac{1}{\beta_m} [T(\cos m\pi - 1)] \sin(\beta_m r) \quad (9)$$

式中： r 为试样中某点沿轴向到试样边界的距离； α 为扩散系数， $\alpha = k_s / (\rho_s c_s)$ ，其中 k_s 为试样的导热系数， ρ_s 为岩石的密度， c_s 为岩石的比热； $\beta_m = m\pi / 2R$ ； $\cos m\pi = (-1)^m$ 。

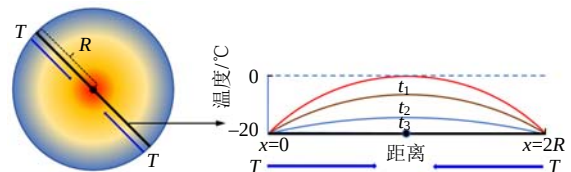


图4 圆柱形试样内部热传导过程简化示意图
Fig.4 Simplified schematic diagram of thermal conduction process inside a cylindrical sample

通过前期试算,在实际模拟时,式(9)中的累加项可取前 20 项进行计算,余项误差对结果影响可控制在 1% 以内。

根据上述分析,考虑热传导过程的冰颗粒冻胀体积计算过程如下:首先根据式(9)计算出与冻结时间对应的试样内部温度场,获得冰颗粒所在位置的温度;再通过式(3)计算出该温度时的未冻结含水率,从而获得冰颗粒的冻胀体积;最后利用式(6)、(7)给出的形式进行循环,从而实现考虑热传导过程的岩石冻胀破坏模拟。

3 冻融损伤离散元模型的建立

通过在 PFC^{3D} 中利用颗粒体积膨胀来模拟冻融循环这一物理变化过程,体积膨胀模型采用前述 2.2 节得到的体积膨胀理论结果。如图 5 所示,蓝色表示岩石颗粒,绿色代表孔隙中的液体。在冷冻过程中,冰颗粒体积膨胀挤压周围的岩石颗粒。当两个相邻的岩石颗粒间的接触力超过其强度时,岩石颗粒间的接触断裂,产生裂纹。为了更好地利用 PFC^{3D} 模拟冻融循环的过程,提出如下假定:①在冻结的过程中饱水砂岩是由岩石颗粒和冰颗粒组成的;②冻结过程中产生的不可恢复的裂隙会继续被水充满,因此冰颗粒的体积会随着冻融循环次数的增加而增加;③0℃以下的温度变化引起的岩石颗粒体积的变化忽略不计。

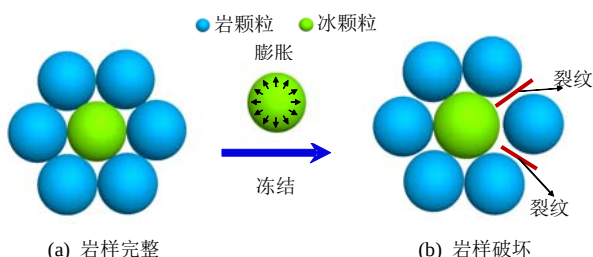


图 5 冰颗粒体积膨胀示意图

Fig.5 Schematic diagram of volume expansion of ice particles

3.1 圆柱形冻融损伤试样的建立

采用四川红砂岩标准圆柱形试样开展不同循环次数的冻融循环试验及单轴压缩试验,以验证本文提出的离散元模型的有效性。试验的最低冻融温度 T 设置为 -20°C ,每次冻融时间为 8 h,最大冻融次数 N 为 300 次。

采用 PFC^{3D} 中性线性平行黏结模型 (linear parallel bond model, 简称 LPBM) 来模拟岩石颗粒、冰颗粒之间的接触行为,该模型可以传递颗粒间的力和力矩。接触强度遵循 Mohr-Coulomb 准则。本文建

立的标准圆柱形试样的直径 $\times$ 高度=50 mm $\times$ 100 mm,模型如图 6 所示。岩石颗粒与冰颗粒的占比可通过测定饱和试样的含水率获得,将饱和试样中的饱和含水率转换为试样中岩石颗粒和水的体积占比,根据岩石颗粒和水(模型中的冰颗粒)的体积分数在 PFC^{3D} 中生成相应体积占比的颗粒模型。该模型共有 66 672 个颗粒,其中岩石颗粒 39 546 个,岩石颗粒的半径为 0.8~1 mm。冰颗粒 27 126 个,冰颗粒半径为 0.3~0.5 mm。初始状态下模型中含有 276 569 个接触,其中,岩石-冰颗粒接触 105 838 个,岩石-岩石颗粒接触 159 382 个,冰-冰颗粒接触 11 349 个。冻融循环模拟完成后,删除模型中所有的冰颗粒,再进行单轴压缩试验,轴向应力以位移控制模式施加,位移速率为 0.05 m/s。

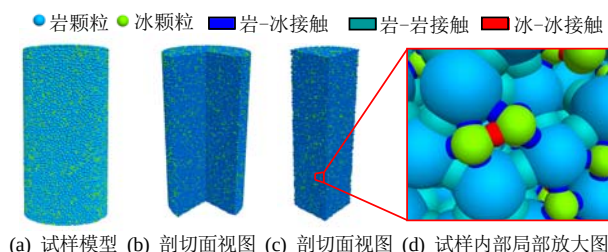


图 6 考虑冻融损伤圆柱形岩石试样模型

Fig.6 Numerical model of a cylindrical sandstone sample subjected to freeze-thaw cycles

3.2 模型参数的校准与评估

首先通过式(9)计算每个时步颗粒的温度,再通过式(3)计算出该温度时的未冻结含水率,利用式(6)、(7)给出的形式进行循环。衰减常数 λ 参考岩石试样孔隙率与冻融次数的拟合公式(1)中的指数项系数确定,对表 1 中试验测得的不同冻融次数后试样孔隙率结果进行拟合,拟合公式为 $\varphi = 17.78 - 5.59e^{-0.00249N}$ 。指数项系数为 0.002 49,因此,本文衰减常数 λ 设置为 0.002 5。

表 1 冻融前后孔隙率变化

Table 1 Variation in porosity before and after freeze-thaw cycles

冻融循环次数 /次	冻融前孔隙率 / %	冻融后孔隙率 / %
0	12.12	12.12
50	12.23	12.86
100	12.18	13.62
200	12.28	14.13
300	12.12	15.23

图 7 展示了不同计算时间下,采用式(9)计算获得的试样内部空间的温度场分布情况。由图可

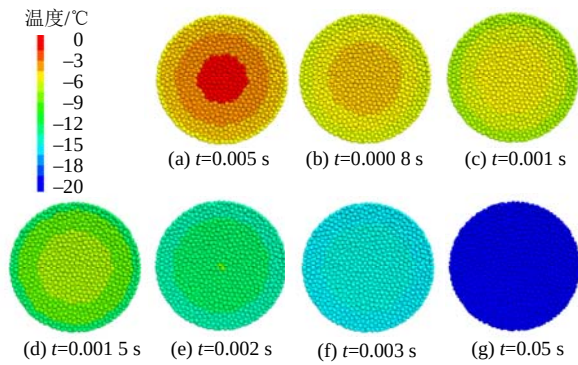


图7 不同计算时间下岩石试样内部的温度场分布情况
Fig.7 Temperature field distribution in rock samples under different calculation times

可以看出,温度从试样表面沿着径向向试样中心传递,试样内部的温度逐渐降低,越靠近试样边界,温度下降得越快,当计算时间达到 0.05 s 时,试样各处的温度都接近于 -20°C 。需要指出的是颗粒离散元中的计算时间并不代表真实时间。图 8 记录了距离试样边界 $0.5R$ 处的试样温度变化情况,可以通过设置不同的扩散系数 α 来减少计算时间,使试样内部更快速到达目标温度。

模型中的细观接触参数如表 2 所示,表中参数

是通过标定 0 次冻融劣化后的岩石单轴试验应力-应变曲线获得(见图 9)。标定参数时删除模型中的冰颗粒,试验测得单轴抗压强度为 32.68 MPa,弹性模量为 10.24 GPa, PFC^{3D} 模拟的单轴抗压强度为 32.70 MPa,弹性模量为 10.30 GPa。冰颗粒与冰颗粒、冰颗粒与岩石颗粒间的变形参数参照岩石颗粒与岩石颗粒来设置,岩石-冰颗粒接触和冰-冰颗粒接触的强度参数都被设置为足够大,确保在冻融循环期间试样的破裂均是发生在岩石颗粒间。岩石颗粒和冰颗粒的颗粒参数见表 3。

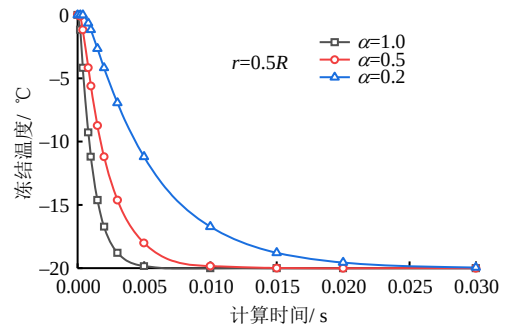


图8 不同扩散系数 α 下的试样内部温度变化曲线
Fig.8 Curves of temperature inside samples under the different diffusion coefficients α

表2 模型细观力学参数

Table 2 Mesomechanics parameters used in calculation model

接触类型	平行黏结抗拉强度 / MPa	平行黏结黏聚力 / MPa	平行黏结摩擦角 / ($^{\circ}$)	平行黏结有效模量 / GPa	平行黏结 刚度比	有效模量 / GPa	刚度比	摩擦系数
岩-岩接触	16.5	13	32	6.45	1.5	6.45	1.5	0.5
岩-冰接触	1 000.0	1 000	0	6.45	1.5	6.45	1.5	0.5
冰-冰接触	1 000.0	1 000	0	6.45	1.5	6.45	1.5	0.5

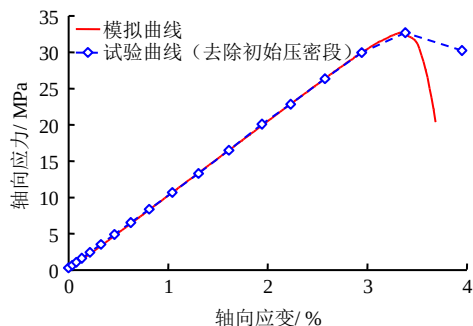


图9 参数标定曲线(0次冻融循环单轴试验)
Fig.9 Parameter calibration curve (uniaxial compressive test under 0 freeze-thaw cycle)

表3 岩石颗粒和冰颗粒的参数

Table 3 Parameters of rock particle and ice particle

颗粒参数	最小颗粒半径 / mm	最大颗粒半径 / mm	颗粒密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热扩散系数
岩石颗粒	0.8	1.0	2 700	0.5
冰颗粒	0.3	0.5	930	0.5

3.3 模型的验证

图 10 对比了不同冻融循环次数的数值试样在单轴压缩试验下的应力-应变曲线与室内试验的应力-应变曲线。总体而言,随着循环次数的增加,试样的单轴抗压强度逐渐降低,这与本文室内试验观察到的现象一致,验证了本文所提出模型的有效性。

图 11 为 DEM 数值试验和室内试验的单轴抗压强度随冻融循环次数的变化趋势。单轴抗压强度随着循环次数的增加呈现非线性下降趋势,这是由于冻融循环增加了岩石孔隙内冰颗粒的体积,导致冰颗粒对周围岩石颗粒的作用力增大,随着冻融循环次数的增加,岩石在冰颗粒体积膨胀的作用力下产生破裂,形成裂纹,造成岩石单轴抗压强度降低。

根据室内试验结果可知,岩石孔隙率的增加与循环次数呈指数关系,因此,本文尝试采用指数函

数式(2)来拟合单轴抗压强度与冻融循环周数的关系。室内试验的单轴抗压强度与冻融循环周期的拟合函数为

$$\sigma_{\text{UCS}} = 17.78 + 14.88e^{0.002\ 08N} \quad (10)$$

式(10)的相关系数 $R^2 = 0.999$ 。

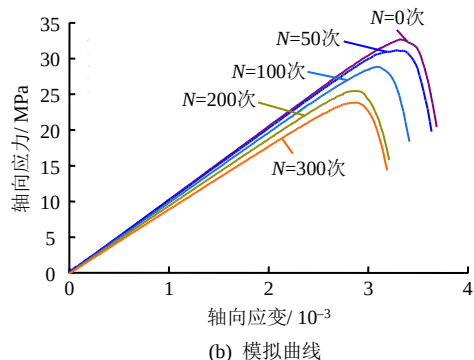
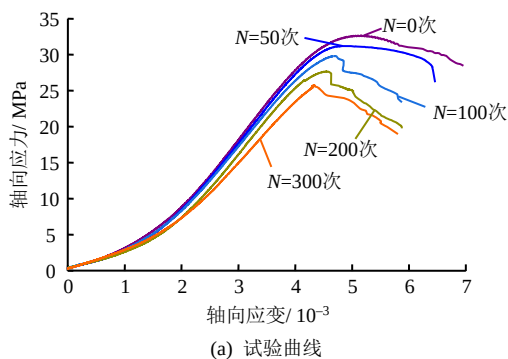


图 10 应力-应变曲线试验结果与模拟结果对比
Fig.10 Comparison of stress-strain curves between numerical and experimental results

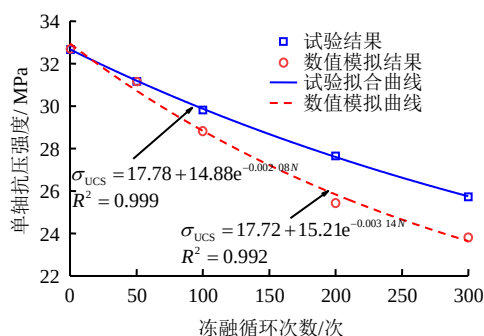


图 11 单轴抗压强度试验结果与数值模拟结果对比
Fig.11 Comparison of uniaxial compressive strength between test results and numerical simulation results

DEM 模拟的单轴抗压强度与冻融循环周期的拟合函数为

$$\sigma_{\text{UCS}} = 17.72 + 15.21e^{-0.003\ 14N} \quad (11)$$

式(11)的相关系数 $R^2 = 0.992$ 。

需要说明的是,本文中 DEM 参数的标定是以 0 次冻融循环后的砂岩应力-应变曲线为基础的,这也导致采用相同的细观接触参数的情况下,随着冻融循环次数的增加,DEM 模拟获得的砂岩单轴抗压强度与室内试验结果有一定的偏差,但最大误差不超过 8%,在可接受的范围之内。

4 岩石冻融损伤机制分析

4.1 冻融循环过程中裂纹发展规律

当前由于试验手段的局限性,对于岩石试样内裂纹的观察与统计尚无直接有效的手段,DEM 可记录试验冻融循环过程中微裂纹数目,据此可定量分析冻融损伤演化过程。图 12 统计了试样内部裂纹数量与冻融循环次数的关系。可以看出,裂纹的发育随冻融循环次数的增加可分为明显的三阶段。

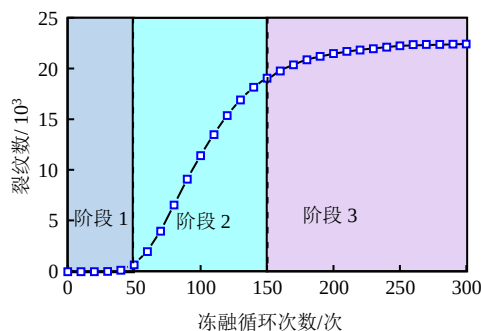


图 12 冻融损伤引起的裂纹生长及阶段划分
Fig.12 Crack growth and phasing due to freeze-thaw damage

第 1 阶段,冻融循环次数小于 50 次时,冻融引起的裂纹增长并不显著,表明前期冰颗粒引起的体积膨胀仍在岩石颗粒能承受的变形能力之内。随着循环过程中不断饱水,增加了冰颗粒的膨胀体积,一旦冰颗粒膨胀所产生的总压力超过了岩石的局部抗拉强度,就会产生局部的微裂纹。

第 2 阶段,冻融循环次数在 50~150 次之间,冻融引起的裂纹有一个迅速增长的过程,试样内的裂纹随冻融循环次数呈现近乎线性增长的趋势。该阶段内微裂纹的连接成核构成了宏观裂纹。当裂纹数超过某个临界阈值时,微裂纹转变为宏观裂隙并迅速扩展,但这一临界阈值与岩石种类、冻融温度等因素有关,刘杰等^[39]在进行了 80 次冻融循环后,才发现岩石的质量、直径损失量陡增,损伤迅速发展。

第 3 阶段,当冻融循环次数超过 150 次后,裂纹增加的速度逐渐减小。该阶段内,试样内部已经形成了贯通的损伤区,损伤区内的变形模量显著降低,对冰颗粒体积膨胀的约束能力降低,造成旧裂

纹的错动，从而减少了未损伤区内新裂纹的萌生。

图 13 展示了不同冻融循环次数的试样裂纹在其内部的分布特征。当冻融循环次数达到 50 次时，试样表面出现了明显的较为集中的裂纹，相对于中间的岩石颗粒，靠近表面的颗粒受到的约束力更小，且更易受外界热量的传导影响，因此裂纹容易在表面产生。当冻融循环次数增加，裂纹逐渐向试样内部发展。当循环次数继续增加到超过 200 次时，试样内部开始出现较为集中的裂纹分布带，较为集中的裂纹相互贯通，形成了一些较为密集的伤害区。当循环次数达到 300 次时，裂纹增加速率有所减缓，主要还是分布在已形成的损伤区附近。这是由于损伤区内的颗粒间的黏结破坏，相对于未损伤区域，颗粒约束很少，因此其附近更容易产生新的冻胀裂纹。

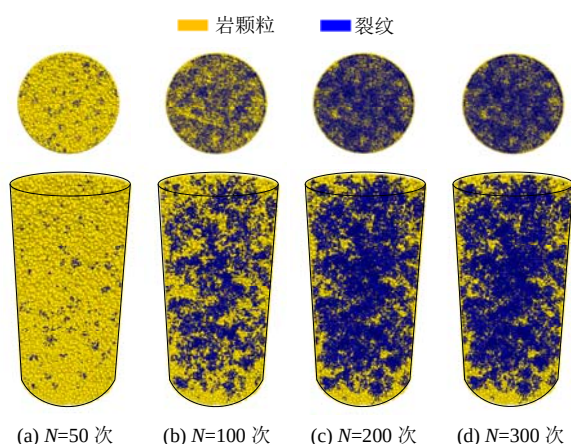


图 13 不同冻融循环次数后试样裂纹分布图

Fig.13 Distribution of cracks inside the sandstone samples after different freeze-thaw cycles

4.2 冻融损伤裂纹的分布规律

大量的学者研究发现，冻融循环过程中岩石的损伤劣化由表层逐渐向内层发展^[40]。刘杰等^[39]提出了层进式损伤的 CT 精准识别方法，分析了宜昌砂岩层进式损伤过程中圆柱试样径向不同圈层 CT 值的变化。研究表明，对于宜昌砂岩，80 次冻融循环为明显拐点，超过 80 次后外层 CT 值降低至 0。

为了更准确地描述冻融损伤引起的试样非均匀性裂纹分布特征，本文将试样进行区域划分，如图 14 所示。在径向上以 $\Delta R=5\text{ mm}$ 为一个区间长度，将试样在径向上划分成 5 个同心圆环柱，沿着径向自内而外分别记作区域 $R_i (i=1, \dots, 5)$ 。统计不同冻融循环次数后，各区域内裂纹的分布数量。

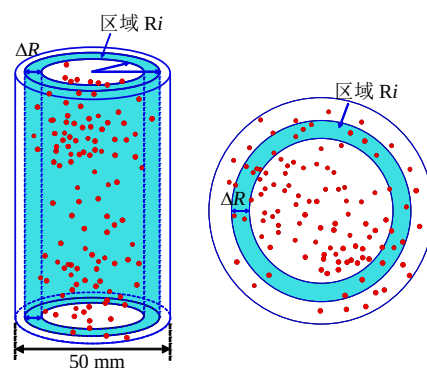


图 14 圆柱形试样圈层划分示意图

Fig.14 Schematic diagram of circle division for cylindrical specimens

图 15 为经过不同冻融循环次数后试样内裂纹径向的分布规律。总体而言，越靠近试样外表面的区域，其内部分布的裂纹数量越多，80%左右的裂纹分布在距离试样轴心 10~25 mm 的圆环柱区域内。这同样表明了越靠近轴心区域，岩石颗粒受到的约束越大。冰颗粒膨胀引起的变形由受约束较少的靠近试样表面区域的岩石颗粒承担。同时，该图也表明，冻融循环引起的损伤是从试样表面逐渐向试样内部发育的，试样冻融循环后将发生由外而内的层进式损伤。通过对图 15 中的数据进一步拟合，以描述径向裂纹分布随着距离试样轴心距离的变化，发现当冻融循环次数低于 80 次时，径向裂纹分布随着距离试样轴心距离呈指数函数关系（见图 15(a)）：

$$N_d = N_1 + Ae^{\zeta(d-d_1)} \quad (12)$$

式中： N_d 为径向区域的裂纹数量； d 为距试样轴心的距离； N_1 为径向区域 R_1 内的裂纹数量； d_1 为径向区域 R_1 到试样中心的距离； A 和 ζ 为拟合参数。

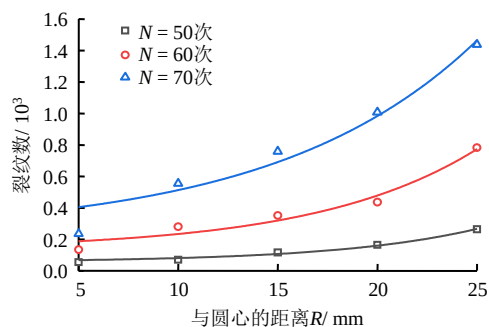
冻融循环次数为 50、60、70 次时的拟合参数及相关系数见表 4。可以看出，拟合的相关系数 R^2 都超过了 0.95，表明指数函数能较好地反映冻融循环次数低于 80 次时试样内径向裂纹的分布特征。

当冻融循环次数超过 80 次时，径向裂纹分布随着距离试样轴心距离呈对数函数关系（见图 15(b)）：

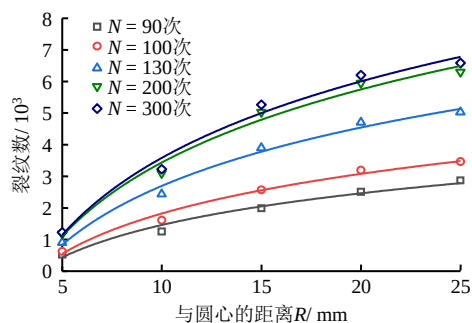
$$N_d = N_1 + B \ln \left(\frac{d}{d_1} - l \right) \quad (13)$$

式中： B 和 l 为拟合参数。

冻融循环次数为 90、100、130、200、300 次时的拟合参数及相关系数见表 5。同样，所有相关系数 R^2 都超过了 0.95。因此，对数函数能较好地描述冻融循环次数超过 80 次时试样内径向裂纹的分布特征。



(a) 低于 80 次冻融循环试样内径向裂纹的分布



(b) 高于 80 次冻融循环试样内径向裂纹的分布

图 15 不同圈层裂纹数与中心线距离的关系

Fig.15 Relationship between the number of cracks in different circles and the distance from the centerline

表 4 冻融循环次数小于 80 次时裂纹分布拟合参数

Table 4 Parameters of fitting equation when $N < 80$ cycles

N / 次	d_i /mm	N_i	A	ζ	R^2
50	5	55	12.91	0.14	0.986
60	5	135	53.44	0.12	0.967
70	5	236	168.95	0.10	0.957

表 5 冻融循环次数大于 80 次时裂纹分布拟合参数

Table 5 Parameters of fitting equation when $N > 80$ cycles

N / 次	d_i /mm	N_i	B	l	R^2
90	5	520	1 417	-0.062	0.982
100	5	623	1 783	-0.041	0.988
130	5	900	2 640	-0.026	0.989
200	5	1 178	3 310	-0.023	0.986
300	5	1 222	3 462	-0.023	0.986

4.3 冻融-应力耦合条件下损伤发展规律

图 16 展示了 DEM 模拟单轴压缩试样破坏后的裂纹分布特征, 对比室内试验破坏后的砂岩试验照片, 两者破坏后的裂纹分布, 破裂面的形态较为一致。从图中可以看出, 岩石主要发生剪切破坏, 局部伴随有张拉破坏。随着冻融循环数量的增加, 岩石的破碎程度逐渐增加。在无冻融情况下, 岩石仅存在一条剪切裂缝。随着冻融次数的逐渐增多, 岩石破坏后的裂缝数量明显增加。冻融循环 200 次情况下, 岩石不仅存在倾斜的剪切裂缝, 同时存在竖向的张拉裂缝。冻融循环 300 次情况下, 尽管剪切

裂缝数量并未增加, 但明显可以看出, 岩石在裂缝两端已明显发生断裂。

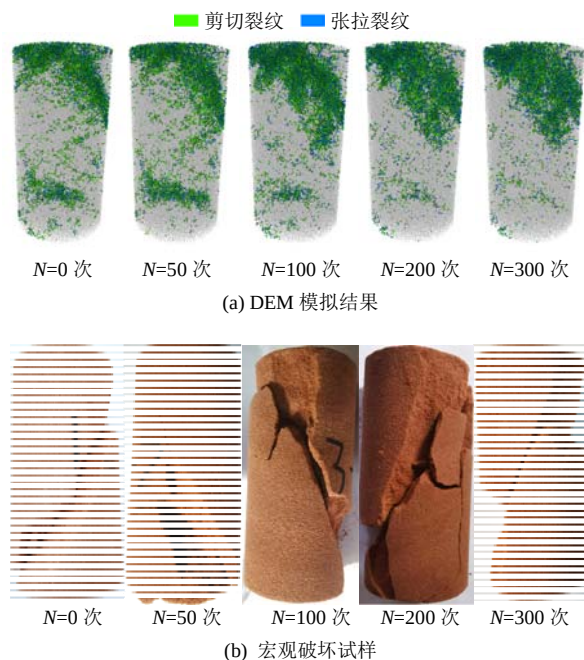


图 16 DEM 模拟结果与宏观破坏试样的比较

Fig.16 Comparison between DEM simulation results and macroscopic failure samples

PFC 中可以根据颗粒间黏结断裂时的受力状态来区分裂缝破坏模式是剪切破坏还是张拉破坏, 从而弥补试验中对试样微裂纹破坏模式分析的不足。为了深入分析冻融损伤试样在单轴加载过程中的应力诱导裂纹的发展情况, 对不同冻融循环情况下的裂纹在全应力-应变过程中的演化规律进行分析, 结果如图 17 所示。

考虑冻融循环及不考虑冻融循环条件下砂岩试样描绘了显著不同的裂纹演化规律。对于冻融循环低于 50 次的样品, 当轴向应变达到约 0.001 5 时, 初始荷载相关裂纹开始在试样内部扩展。随着冻融循环次数的增加, 加载引起的裂纹出现得更早。当冻融循环达到 300 次时, 加载应力导致轴向应变为 0.000 4 时裂纹即开始增长。冻融循环对样品造成内部损伤, 削弱抗变形能力, 加速初始裂纹的产生。就裂纹的类型而言, 剪切裂纹是试样失效的主要原因。剪切裂纹约占无冻融循环样品总裂纹的 78%。随着循环次数的增加, 这一比例逐渐减小。对于经受 300 次冻融循环的试样, 剪切裂纹减少到最低 63%。这表明冻融循环造成的破坏使岩石内部更容易发生拉伸破坏。这种现象也反映在加载过程早期出现的初始裂纹类型中。在经历 0、50 和 100 次冻融循环的试样加载过程中, 初期的应力诱导裂纹是

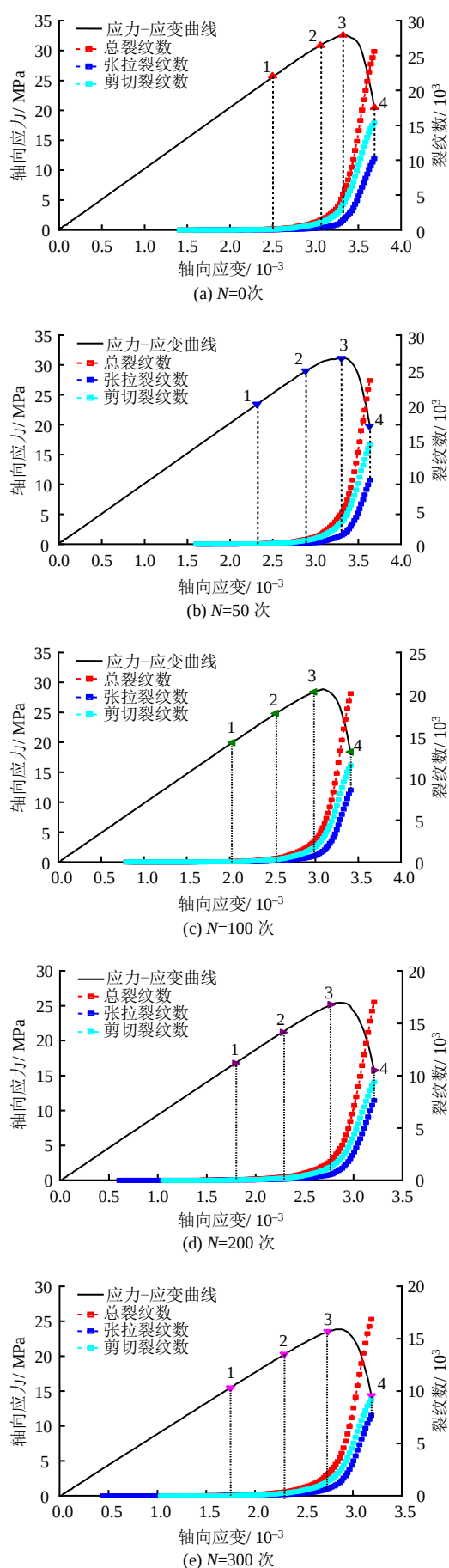


图 17 不同冻融循环样品的裂纹演化过程

Fig.17 Crack evolution process of samples subjected to different freeze-thaw cycles under uniaxial compression

由剪切破坏产生的剪切裂纹。然而，在经历 200 和 300 次冻融循环的样品中，初期的诱导裂纹以拉伸裂纹为主。

岩石的损伤破裂是外力加载下其微裂纹不断萌生、扩展、成核的宏观体现。为了描述单轴加载下裂纹在试样中的发展过程，选取应力-应变曲线中的 4 个典型状态（对应于图 17 中 4 个特征点），记录试样加载过程中微裂纹的分布情况，结果如图 18 所示。

当试样加载到点 1 时，试样内开始出现少量零散分布的微纹。随着轴向应变的增大，线弹性阶段轴向偏应力呈线性增大趋势。通过对图 17 中试样的裂纹演化过程的裂纹数量求导数，获得裂纹的增长率，发现当轴向偏应力从点 1 上升到点 2，裂纹数增长速度加快，同时出现局部微裂纹集中发育的现象，主要集中在试样的上端和下端。当轴向偏应力达到峰值点 3，裂纹总数增加迅速，局部集中的微裂纹簇迅速扩展。此时，试样两端的裂缝逐渐合并并向试样中部延伸。当加载应力超过峰值强度后，伴随着裂纹数量的快速增长，裂纹的合并加深了试件两端的破坏程度，微裂纹在宏观张拉裂纹平面中聚结并渗透，导致试件最终分裂破坏。

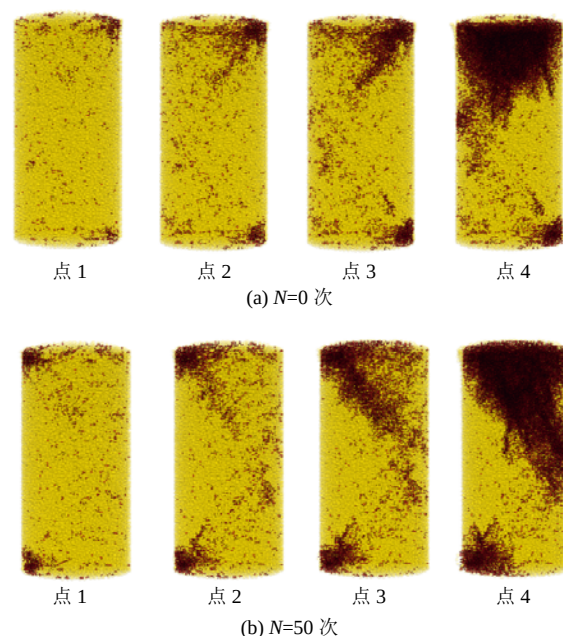


图 18 单轴加载过程中冻融损伤试样裂纹发展过程
Fig.18 Developing process of loading-induced cracks
of samples subjected to freeze-thaw cycles
under uniaxial compression

比较 0 次冻融循环（见图 18(a)）及 50 次冻融循环（见图 18(b)）的结果发现，相同应力状态条件下，经过冻融损伤的试样裂纹发展速率更快，特别

是当试样处于屈服阶段。冻融循环引起试样内部损伤, 抗变形能力弱化, 加速了初始裂纹的产生。冻融循环引起岩石内部结构变化, 外荷载产生的裂纹是冻融损伤裂纹在外力作用下的延续和扩展。

4.4 孔隙率演化对岩石冻融损伤的影响

如前所述, 岩石的冻融损伤受岩石自身因素的影响。特别是岩石的孔隙结构及其演化特征控制了冻融过程中水分迁移及体积膨胀的发展。不同种类的岩石其孔隙率演化规律不同, 若采用指数函数描述岩石孔隙率随冻融次数的演化关系, 如式(1)所示。那么衰减常数 λ 则是反映不同种类岩石受冻融损伤影响程度的重要参数。

图 19 展示了不同衰减常数 λ 对冻融损伤的影响, 衰减常数 λ 取值与冻融过程中岩石孔隙率演化方程中的指数项拟合常数有关, 反映了冻融损伤后岩石孔隙率增加的速度, λ 越小, 冻融损伤后孔隙率增加速度越快。从图 19 还可以看出, 相同冻融循环次数下, λ 越小, 试样中产生的冻融裂纹数量越多, 表明冻融损伤过程中宏观孔隙率的增加与微观裂纹的增加是一一对应的关系。

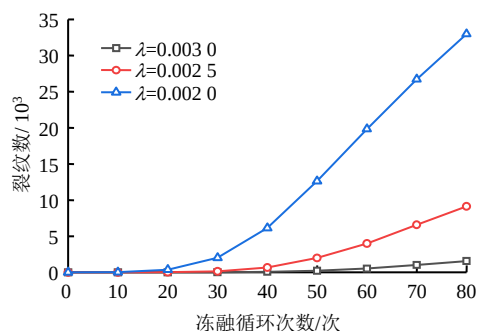


图 19 孔隙率衰减常数对冻融损伤试样内裂纹发育的影响

Fig.19 Influence of porosity attenuation index on the growth of cracks inside samples subjected to freeze-thaw cycles

5 结 论

低温下岩石中的孔隙水冻结膨胀是造成岩石冻胀破坏的主要原因, 基于体积膨胀理论构建一种新的颗粒膨胀模型, 通过引入热传导方程及不可逆孔隙体积增加率演化方程, 建立了一种基于 DEM 的模拟饱水岩石冻融循环损伤的分析方法, 能够真实反映岩石冻融循环物理机制。获得如下结论:

(1) 对比 DEM 模拟结果与试验得到的砂岩应力-应变关系及单轴抗压强度随冻融循环次数演化曲线表明, 本文提出的方法可较好地反映岩石冻融损伤过程及冻融-应力耦合作用过程。

(2) 裂纹随冻融循环次数的增长可以划分成缓慢增长、迅速增长及趋于稳定 3 个阶段, 并且 80% 左右的冻胀裂纹分布在距离试样轴心 10~25 mm 的圆环柱区域内。

(3) 剪切破坏是造成单轴压缩下砂岩破坏的主要原因, 但随着冻融循环次数的增加, 张拉裂纹对试样破坏的贡献在逐渐提升。外荷载产生的裂纹是冻融损伤裂纹在外力作用下的延续和扩展。

(4) 岩石的孔隙结构特征控制着冻融循环过程中损伤的演化, 随着冻融循环次数的增加, 孔隙率变化越慢, 裂纹的增加也越慢。

参 考 文 献

- [1] 伍毅敏, 李文博, 傅鹤林, 等. 季冻区隧道过渡段二衬短周期冻融数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1930-1935.
WU Yi-min, LI Wen-bo, FU He-lin, et al. Numerical simulation of freeze-thaw in short period of secondary lining at tunnel transition section in seasonal frozen area[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(10): 1930-1935.
- [2] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. **Engineering Geology**, 1968, 2(5): 315-323.
- [3] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机制分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076-3082.
XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [4] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 731-737.
ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, XU Yu-juan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 731-737.
- [5] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688-1694.
ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. **Chinese Journal of Rock**

- Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1688-1694.
- [6] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 452-471.
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(3): 452-471.
- [7] 杨鸿锐, 刘平, 孙博, 等. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 545-555.
YANG Hong-rui, LIU Ping, SUN Bo, et al. Study on damage mechanisms of the microstructure of sandy conglomerate at Maijishan grottoes under freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(3): 545-555.
- [8] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 830-839.
LIU Hui, LIN Jiang-hao, YANG Geng-she, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2021, 38(4): 830-839.
- [9] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 冻融环境下红砂岩三轴蠕变特性及其模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 841-849.
SONG Yong-jun, ZHANG Lei-tao, REN Jian-xi, et al. Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(5): 841-849.
- [10] 汪鑫, 郑达, 吴鑫尧, 等. 冻融循环条件下英安岩损伤劣化力学机制研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10421-10429.
WANG Xin, ZHENG Da, WU Xin-long, et al. Mechanical mechanism of dacite damage deterioration under freeze-thaw cycles[J]. **Science Technology and Engineering**, 2021, 21(24): 10421-10429.
- [11] HUANG D, ZHU T T. Experimental and numerical study on the strength and hybrid fracture of sandstone under tension-shear stress[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2018, 200: 387-400.
- [12] FOGUE-DJOMBOU Y I, CORN S, CLERC L, et al. Freeze-thaw resistance of limestone roofing tiles assessed through impulse vibration monitoring and finite element modeling in relation to their microstructure[J]. **Construction & Building Materials**, 2019, 205: 656-667.
- [13] YAHAGHI J, LIU H, CHAN A, et al. Experimental and numerical studies on failure behaviours of sandstones subject to freeze-thaw cycles[J]. **Transportation Geotechnics**, 2021, 31: 100655.
- [14] 王瑾. 冻融-受荷作用下裂隙岩体破裂演化机制与数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
WANG Jin. Study on fracture evolution mechanism and numerical simulation of fractured rock mass under freeze-thaw and load[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [15] 朱谭谭, 李昂, 黄达, 等. 应力-冻融耦合作用下砂岩变形与损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 342-351.
ZHU Tan-tan, LI Ang, HUANG Da, et al. Deformation and damage characteristics of sandstone under the combined action of stress and freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(2): 342-351.
- [16] 贾海梁, 项伟, 谭龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879-895.
JIA Hai-liang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 879-895.
- [17] DEPREZ M, DE KOCK T, DE SCHUTTER G, et al. A review on freeze-thaw action and weathering of rocks[J]. **Earth-Science Reviews**, 2020, 203: 103143.
- [18] 张二锋, 杨更社, 刘慧. 冻融循环作用下砂岩细观损伤演化规律试验研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 50-55.
ZHANG Er-feng, YANG Geng-she, LIU Hui. Experimental study on meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. **Coal Engineering**, 2018, 50(10): 50-55.
- [19] 张君岳, 田镇, 刘桓兑, 等. 冻融红砂岩物理力学性质损伤演化试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(10): 79-84.
ZHANG Jun-yue, TIAN Zhen, LIU Huan-dui, et al. Experimental study on damage evolution of physical and mechanical properties of freeze-thaw red sandstone[J]. **Mining Research and Development**, 2020, 40(10): 79-84.
- [20] ZHOU Ke-ping, LI Bin, LI Jie-lin, et al. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment[J]. **Transactions of Nonferrous**

- Metals Society of China**, 2015, 25(4): 1254-1261.
- [21] LI Jie-lin, ZHOU Ke-ping, LIU Wei-jie, et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2016, 26(11): 2997-3003.
- [22] 张慧梅, 谢祥妙, 彭川, 等. 三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1444-1452.
- ZHANG Hui-mei, XIE Xiang-miao, PENG Chuan, et al. Constitutive model for damage of freeze-thaw rock under three-dimensional stress[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(8): 1444-1452.
- [23] FANG Wen, JIANG Nan, LUO Xue-dong. Establishment of damage statistical constitutive model of loaded rock and method for determining its parameters under freeze-thaw condition[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, 160(4): 31-38.
- [24] TAN Xian-jun, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2011, 68(3): 130-138.
- [25] HOU Chao, JIN Xiao-guang, HE Jie, et al. Experimental studies on the pore structure and mechanical properties of anhydrite rock under freeze-thaw cycles[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2022, 14(3): 781-797.
- [26] 母剑桥, 裴向军, 黄勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 103-108.
- MU Jian-qiao, PEI Xiang-jun, HUANG Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing action[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(1): 103-108.
- [27] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 140-145, 151.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2011, 40(1): 140-145, 151.
- [28] MURTON J B, PETERSON R, OZOUF J C. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions[J]. **Science**, 2006, 314(5802): 1127-1129.
- [29] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. **Journal of the American Concrete Institute**, 1945, 16(4): 245-272.
- [30] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. **The Journal of Geology**, 1930, 38(4): 303-317.
- [31] EVERETT D H. Thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. **Transactions of the Faraday Society**, 1961, 57(5): 1541-1551.
- [32] SCHERER G W. Crystallization in pores[J]. **Cement and Concrete Research**, 1999, 29(8): 1347-1358.
- [33] PETRENKO V, WHITWORTH R. Physics of ice[M]. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [34] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2000-2012.
- LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 2000-2012.
- [35] ZHU T T, CHEN J X, HUANG D, et al. A DEM-based approach for modeling the damage of rock under freeze-thaw cycles[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(1): 2843-2858.
- [36] FENG Q, JIN J C, ZHANG S, et al. Study on a damage model and uniaxial compression simulation method of frozen-thawed rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55(1): 187-211.
- [37] KHANLARI G, SAHAMIEH R Z, ABDILOR Y. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of upper red formation sandstones, central part of Iran[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2015, 8(8): 5991-6001.
- [38] MUTLUTÜRK M, ALTINDAG R, TÜRK G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(2): 237-244.
- [39] 刘杰, 张瀚, 王瑞红, 等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394.
- LIU Jie, ZHANG Han, WANG Rui-hong, et al. Investigation of progressive damage and deterioration of sandstone under freezing-thawing cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(5): 1381-1394.
- [40] 张慧梅, 王云飞. 冻融红砂岩损伤演化多尺度分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2103-2114.
- ZHANG Hui-mei, WANG Yun-fei. Multi-scale analysis of damage evolution of freezing-thawing red sandstones[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(8): 2103-2114.